

DISEÑO DE REFLECTARRAYS MEDIANTE PSO Y CG-FFT

I. López, J. R. Pérez, J. Basterrechea

lopezbi@unican.es, perezjr@unican.es, jose.basterrechea@unican.es

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Laboratorios de I+D de Telecomunicaciones, Plaza de la ciencia, Avda. Los Castros s/n. 39005, Santander (Cantabria)

Abstract- A method for the design of reflectarray antennas that uses the PSO optimizer to carry out the synthesis of the phases at each reflectarray element and the CG-FFT method to obtain the design curves for the elements, is presented in this work.

The analysis method has been validated against results available in the literature for rectangular patches. Furthermore, the method is able to analyze any geometry that can be properly modeled by a uniform mesh on both directions in the unit cell. At this moment, only one metallic layer, apart from the ground plane, can be analyzed.

Radiation patterns for both medium and large size reflectarrays are included.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha resurgido el interés en el empleo de reflectarrays para reemplazar a los reflectores parabólicos en algunas aplicaciones, debido fundamentalmente a su menor volumen y mejores características mecánicas desde el punto de vista de su plegado para aplicaciones en satélites. Recientemente, ha sido publicada una monografía sobre el tema que recoge gran parte de los desarrollos históricos así como los trabajos más recientes en este campo [1].

El principio de operación de este tipo de estructuras se basa en la introducción de desfases adicionales que permiten controlar la forma del diagrama de radiación resultante. En la actualidad están constituidos, básicamente, por un plano reflector sobre el que a cierta distancia y, generalmente sobre un dieléctrico, se sitúan elementos metálicos que permiten introducir el desfase requerido controlando sus geometrías de forma local (Fig. 1). Las geometrías de estos elementos pueden ser variadas (tiras conductoras, ranuras, anillos conductores, ranuras en anillo, cruces, parches, etc.) en función de las características de polarización requeridas.

La principal limitación de este tipo de estructuras es su reducido ancho de banda, que viene condicionado por el tipo de elementos que se emplean para introducir el desfase y por el tamaño del reflectarray, puesto que si éste es grande, provoca desfases diferenciales de alimentación significativos entre las zonas centrales y los bordes del reflectarray. La técnica más habitualmente empleada para incrementar el ancho de banda pasa por utilizar varias capas de elementos acoplados.

El proceso de diseño de un reflectarray consiste básicamente en una síntesis de fase para satisfacer la forma especificada del diagrama de radiación. Esta síntesis da como resultado el desfase que debe introducir cada elemento del reflectarray. Para caracterizar la respuesta en fase de los

elementos del reflectarray y para reducir los tiempos de cálculo, se suelen considerar condiciones de periodicidad local que proporcionan buenos resultados.

En este trabajo se presenta una propuesta de método de diseño que combina el método heurístico de optimización con enjambre de partículas (PSO) para obtener la respuesta en fase que deben producir los elementos del reflectarray y el método CG-FFT para obtener sus curvas de diseño.

El problema de síntesis involucra un gasto computacional importante que se agudiza para reflectarrays de grandes dimensiones formados por varios miles de parches.

Se muestran resultados ilustrativos tanto del proceso de síntesis como del de análisis.

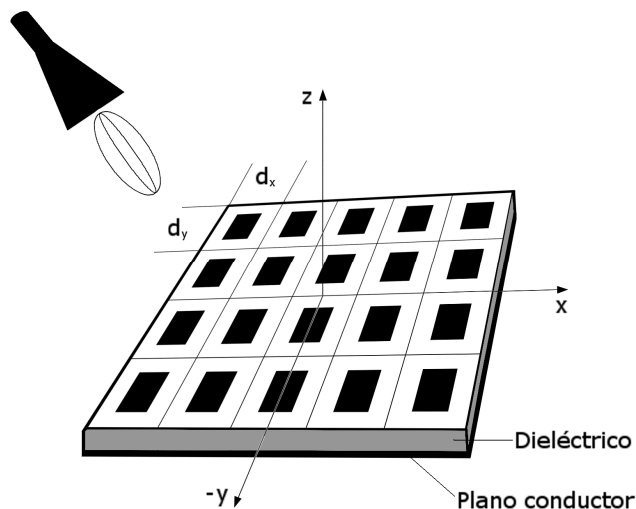


Fig. 1. Representación esquemática de un reflectarray.

II. APLICACIÓN DE PSO A LA SÍNTESIS DE FASE PARA REFLECTARRAYS

Los métodos heurísticos de optimización modernos, como el recocido simulado (SA), los algoritmos genéticos (GA), la optimización por enjambre de partículas (PSO) o la evolución diferencial (ED), entre otros, han despertado gran interés debido a su versatilidad para adaptarse a una gran variedad de aplicaciones. Estos métodos tratan de simular los procesos naturales, biológicos o evolutivos. Concretamente el algoritmo PSO [2] se inspira en el comportamiento de colectivos tales como las bandadas de aves o los enjambres de abejas en su desplazamiento sincronizado e impredecible

en busca de alimento. Dicho algoritmo se postula como una opción interesante frente a otros métodos, debido a su sencilla implementación y sintonización.

En este trabajo se utiliza una versión de PSO con codificación real, actualización asíncrona y topología global que introduce, además, selección por torneo [3]. El mecanismo de selección tiene por misión dirigir la búsqueda hacia el área más adecuada dentro del espacio de soluciones. El inconveniente que puede acarrear la selección por torneo es que puede provocar una convergencia prematura hacia una solución local. Por lo tanto, la eficacia del método depende de la capacidad para preservar la diversidad de la población.

En el algoritmo PSO el enjambre está constituido por I partículas N -dimensionales, con velocidades y posiciones dadas por los vectores $V_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$ y $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$, respectivamente. Los movimientos de búsqueda se realizan de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$v_{in}(k+1) = v_{in}(k) + c_1 r_1(k) \cdot (p_{in}(k) - x_{in}(k)) + c_2 r_2(k) \cdot (g_n(k) - x_{in}(k)) \quad (1)$$

$$x_{in}(k+1) = x_{in}(k) + v_{in}(k+1) \cdot \Delta t \quad (2)$$

donde in representa la dimensión n -ésima de la partícula i , los factores c_1 y c_2 son las constantes de aceleración cognitiva y social, los términos r_1 y r_2 son dos números aleatorios, $P_i=(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN})$ almacena la mejor solución encontrada en su trayectoria por la partícula i y $G=(g_1, g_2, \dots, g_N)$ almacena la mejor solución encontrada por todo el enjambre. A través de una función de fitness se valora la calidad de las partículas, actualizando si es preciso los vectores P_i y G .

En la aplicación del algoritmo a la síntesis de fase en reflectarrays, durante la exploración del espacio de soluciones, los desfases a introducir por cada uno de los elementos del reflectarray se asimilan al vector de posición X_i , obteniendo como solución al final del proceso de optimización el valor almacenado en G .

Para evaluar la calidad de cada partícula en cada iteración del proceso se utiliza una función de coste o función de fitness, que constituye en realidad el único vínculo entre el algoritmo y el problema físico. En este caso, la función de fitness utilizada compara los niveles de señal proporcionados por el reflectarray bajo las condiciones de excitación y desfase en cada momento, con las máscaras MS y MI que constituyen las especificaciones del diagrama de radiación deseado:

$$fitness = \sum_{p=1}^P \left(\max \left(\begin{array}{l} \max((A_p(dB) - MS_p(dB)), 0) \\ \max((MI_p(dB) - A_p(dB)), 0) \end{array} \right)^2 \right) \quad (3)$$

En (3), A_p es el valor del campo en cada uno de los P puntos de observación del diagrama de radiación y MS_p y MI_p los valores de especificación de las máscaras superior e inferior, respectivamente.

Como alimentador se ha considerado un diagrama de radiación de la forma $\cos^q \theta$ que modela adecuadamente a una bocina. La amplitud del campo reflejado por cada parche está fijada por el alimentador. La fase del campo reflejado por el reflectarray se calcula como la suma del desfase debido a la propagación desde el alimentador hasta el centro

de cada elemento y la fase del coeficiente de reflexión asociada a dicho parche. Para realizar las validaciones iniciales del método, en este trabajo solamente se han considerado las contribuciones copolares, por lo que el campo radiado viene dado por:

$$E = V_a \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} V_b A_{m,n} e^{j\phi_{m,n}} e^{j(mk_x d_x + nk_y d_y)} \quad (4)$$

donde:

$$V_a = \frac{jke^{-jkr}}{2\pi r} \text{sinc}\left(k_x \frac{d_x}{2}\right) \text{sinc}\left(k_y \frac{d_y}{2}\right) \cdot e^{\frac{-j(k_x(N_x-1)d_x + k_y(N_y-1)d_y)}{2}} \quad (5)$$

$$V_b = \begin{cases} \cos^2 \varphi + \cos \theta \cdot \sin^2 \varphi & \text{para excitación } E_x \\ \sin^2 \varphi + \cos \theta \cdot \cos^2 \varphi & \text{para excitación } E_y \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} k_x = k_0 \sin \theta \cdot \cos \varphi \\ k_y = k_0 \sin \theta \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (7)$$

y donde N_x y N_y son el número de elementos del reflectarray en cada dirección, d_x y d_y las dimensiones de la celda periódica, θ y φ las direcciones de observación, $A_{m,n}$ es la amplitud del campo en cada elemento del reflectarray y $\phi_{m,n}$ es la fase del campo reflejado en el centro de cada elemento a partir de la cual se obtiene directamente el desfase a introducir.

Este conjunto de fases, $\phi_{m,n}$, conforman el vector de posición del algoritmo PSO que se encarga de buscar, mediante el proceso descrito previamente, el conjunto de valores que colocan el diagrama de radiación resultante dentro de las especificaciones impuestas por las máscaras, guiándose mediante la función de fitness especificada en (3). En la Fig. 2 se muestran curvas típicas de convergencia del proceso.

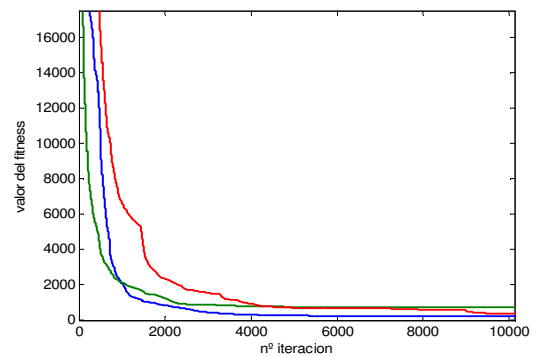


Fig. 2. Curvas típicas de convergencia del proceso de síntesis.

III. CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS: MÉTODO CG-FFT

Para implementar el reflectarray con los desfases obtenidos mediante el proceso de síntesis con PSO, se precisa una herramienta que permita efectuar el diseño de los elementos del reflectarray para conseguir el desfase necesario

en cada elemento. Para este propósito, tal y como se recoge en [4], se han empleado diversos métodos como el MoM en el dominio espectral, el FEM, FDTD y GSM con técnicas de conexión en cascada. En este trabajo se utiliza el método CG-FFT para obtener la respuesta de las estructuras monocapa consideradas hasta el momento.

El método CG-FFT obtiene el campo reflejado por el reflectarray, bajo aproximación de array periódico infinito, resolviendo la ecuación integral de campo eléctrico mediante un proceso iterativo para obtener la fase del campo reflejado.

Considerando la estructura periódica, el proceso de cálculo se apoya en la naturaleza discreta del problema en el dominio transformado y emplea funciones base de tipo rooftop y funciones de test blade-razor para representar las corrientes en las metalizaciones de la celda unidad y realizar el promediado, respectivamente. Como resultado final del desarrollo se obtienen las siguientes expresiones para los operadores del gradiente conjugado:

$$-E_x^{iD}(\vec{r}) = E_{xx}^{SD}(\vec{r}) + E_{xy}^{SD}(\vec{r}) \quad (8)$$

$$-E_y^{iD}(\vec{r}) = E_{yx}^{SD}(\vec{r}) + E_{yy}^{SD}(\vec{r}) \quad (9)$$

con:

$$E_{\alpha\beta}^{SD}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi^2} F^{-1} \left\{ F \left[\prod (\vec{r} - \vec{r}_\alpha^{mn}) \right] \otimes [\tilde{\gamma}_\alpha \tilde{G}_{\alpha\beta}^F \tilde{J}_\beta^D] \right\} \quad (10)$$

$$E_\alpha^{iD}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi^2} F^{-1} \left\{ F \left[\prod (\vec{r} - \vec{r}_\alpha^{mn}) \right] \otimes [\tilde{E}_\alpha^i(\vec{r}) \tilde{\gamma}_\alpha] \right\} \quad (11)$$

donde α y β representan x o y , F y F^{-1} la transformada directa e inversa de Fourier, \sim la transformada de Fourier de la función sobre la que se encuentra, γ la función blade-razor, $\tilde{G}_{\alpha\beta}^F$ la componente $\alpha\beta$ de la función de Green espectral, y \tilde{J}_β^D la transformada de la función base orientada según β .

Como ya se ha señalado, en estos momentos solamente se considera la existencia de una única capa de elementos en el reflectarray y se está analizando la posibilidad de incorporar más en el proceso de resolución o recurrir a una técnica de conexión en cascada similar a la empleada con el método GSM.

La validación del método de análisis se ha efectuado recurriendo a resultados encontrados en la literatura [5]. En la Fig. 3 se muestran la variación de la fase del coeficiente de reflexión a 10GHz para una superficie periódica con 20mm de periodo en ambas direcciones, constituida por parches rectangulares con lado de 10mm, al variar la longitud del otro lado, y cuando se excita con una onda plana polarizada linealmente según y y que incide perpendicularmente ($\Theta=0^\circ$). El dieléctrico tiene 1.52mm de espesor y una constante dieléctrica relativa de 3.5.

Por otra parte, en las Figs. 4(a)-(b) se muestran los resultados obtenidos al variar el espesor del sustrato y su permitividad, respectivamente. Se comprueba como reduciendo el espesor del dieléctrico es posible aumentar el rango de variación de la fase a costa de incrementar su pendiente, lo que dificulta la posterior implementación práctica del reflectarray. Los efectos de la variación de la

permitividad del sustrato son prácticamente nulos desde el punto de vista del rango de fases alcanzables y únicamente se aprecia un suavizado de la pendiente para permitividades bajas.

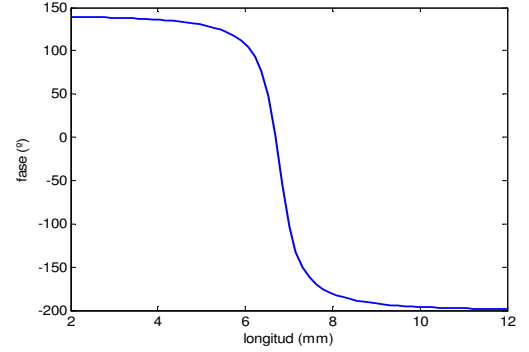


Fig. 3. Variación de la fase del coeficiente de reflexión de un parche rectangular con un lado de 10mm al variar el otro.

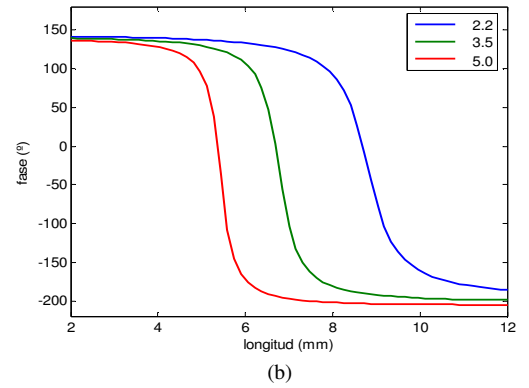
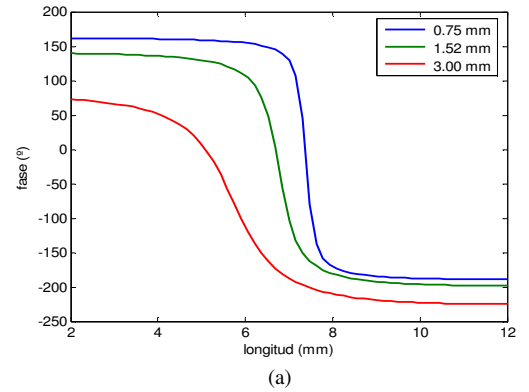


Fig. 4. Variación de la fase del coeficiente de reflexión: (a) variando el espesor del sustrato, (b) variando la permitividad relativa.

IV. RESULTADOS PARA DIAGRAMAS CONFORMADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para el diagrama de radiación para dos configuraciones distintas de reflectarray: uno con un número pequeño de elementos (900) y otro con un número elevado (10000).

En la Fig. 5 se muestra el resultado obtenido para un array de 900 elementos alimentado con una bocina situada en (-150, 0, 1000) mm según la disposición de la Fig.1, en el que el algoritmo ha trabajado con una población de 400 partículas durante 7700 iteraciones. El resto de parámetros del algoritmo PSO son: $w=0.729$, $c_1=c_2=1.49445$, pared reflectante y velocidad máxima para las partículas, V_{max} igual al 50% del rango dinámico en cada dimensión, [2]. La

frecuencia de trabajo es de 18 GHz y el periodo en ambas dimensiones de 10 mm. La máscara inferior utilizada en el proceso de optimización se muestra en la Fig. 5(a) y el diagrama resultante de la síntesis en la Fig. 5(b). La síntesis se ha realizado dando prioridad a las variaciones bruscas de la máscara, y es por ello que la solución se adapta bien a estas variaciones. Sin embargo, no es capaz de mantener el nivel de radiación a lo largo de la región de cobertura y aparecen unas pequeñas regiones sin cubrir.

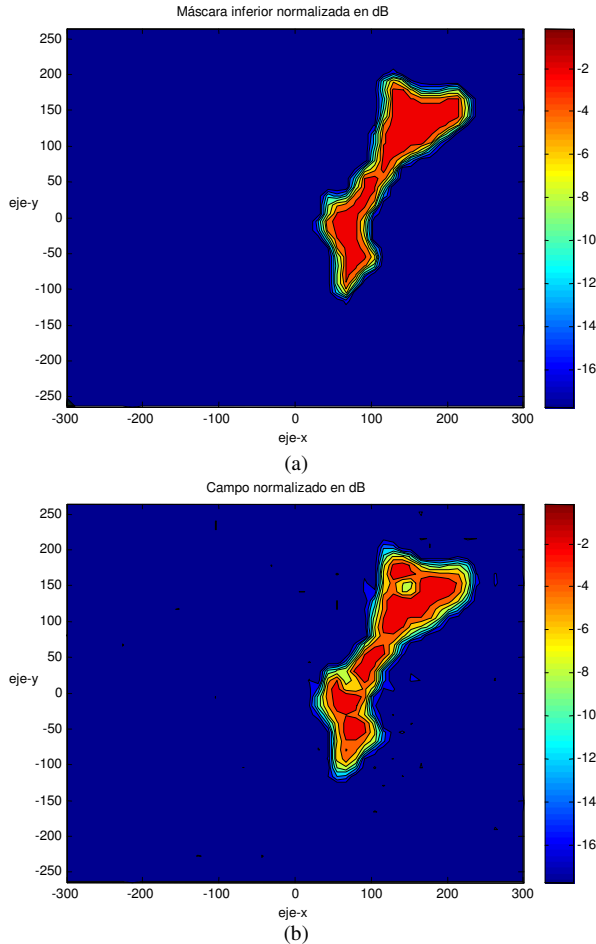


Fig. 5. Síntesis de un reflectarray de 900 elementos, (a) máscara inferior, (b) diagrama de radiación.

Las complicaciones surgen cuando se trabaja con reflectarrays de grandes dimensiones. El número de incógnitas aumenta y con él los grados de libertad, con lo que la exploración del espacio de soluciones es más lenta y compleja. Como ejemplo, en la Fig. 6(b) se muestra el resultado obtenido para un reflectarray de 10000 elementos con una población de 800 partículas cuando se impone la máscara inferior mostrada en la Fig. 6(a). La calidad de la solución obtenida por el optimizador es menor que en el caso anterior.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un método de diseño de reflectarrays que combina un optimizador basado en PSO con una herramienta de análisis basada en CG-FFT para obtener las curvas de diseño de los elementos del reflectarray. En este momento sólo considera estructuras monocapa. La herramienta de análisis basada en CG-FFT se ha validado

contrastándola con resultados disponibles en la literatura. Está prevista su ampliación para abordar el análisis de estructuras multicapa. Además, se han presentado resultados de campo radiado obtenidos mediante el método de síntesis propuesto.

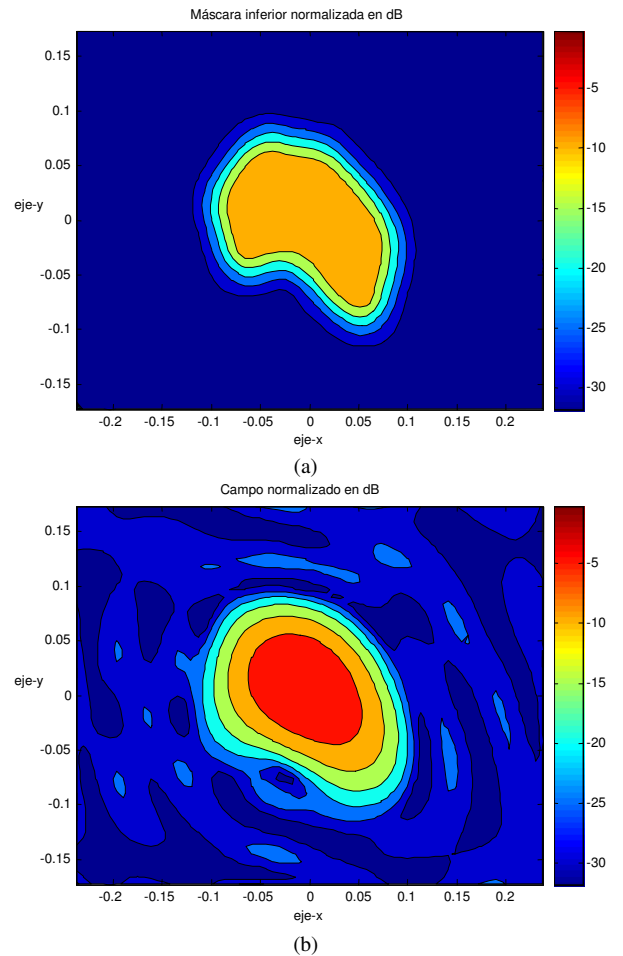


Fig. 6. Síntesis de un reflectarray de 10000 elementos, (a) máscara inferior, (b) diagrama de radiación.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TEC2008-02730/TEC).

REFERENCIAS

- [1] J. Huang, J. A. Encinar, "Reflectarray antennas", IEEE Press, Wiley Interscience, John Wiley and Sons Inc., 2008.
- [2] J. R. Pérez, J. Basterrechea, "Particle Swarm Optimization and its Application to Antenna Far-Field-Pattern Prediction From Planar Scanning", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 44, Number 5, pp. 398-403, Marzo 2005.
- [3] J. R. Pérez, J. Basterrechea, "Particle Swarm Optimization with Tournament Selection for Linear Array Synthesis", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 50, Number 3, pp. 627-632, Marzo 2008.
- [4] M. F. Cátedra, R. P. Torres, J. Basterrechea, E. Gago, "The CG-FFT Method, Application of Signal Processing Techniques to Electromagnetics", Artech House Inc., 1995.
- [5] M. Bozzi, S. Germani, L. Perregrini, "Performance Comparison of Different Element Shapes Used in Printed Reflectarrays", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 2, pp 219-222, 2003.